



TITLE:

自動車用中空構造部材における高強度化と形状自由度向上に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

窪田, 紘明

CITATION:

窪田, 紘明. 自動車用中空構造部材における高強度化と形状自由度向上に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19095>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	窪田 紘明
論文題目	自動車用中空構造部材における高強度化と形状自由度向上に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、自動車用中空構造部材の高強度化と形状自由度の向上を目的に開発された、3次元熱間曲げ焼入れ（以下、3DQ）技術、および可動金型を用いた鋼管ハイドロフォーミング技術についての成形特性を調査した結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、自動車分野において要求されている軽量化と衝突安全性向上に対する技術開発と、管材の成形に関するこれまでの研究をまとめることにより、本研究の意義を示している。また、本研究の目的を示している。</p> <p>第2章では、3DQ技術の概要と、新たに開発した有限要素法（FEM）解析モデルについて説明している。3DQ技術は、申請者らの研究グループが開発した、焼入れ用薄肉鋼管を素材として、熱間で3次元曲げを行いながら焼入れをする技術である。熱源には高周波誘導加熱を用い、丸断面に限らず様々な断面形状を有する強度1470 MPa以上の自動車部品を製造できるものである。本章では、3DQの変形挙動を精度良く解析するために、高周波誘導加熱による温度分布と金属組織変化を考慮したFEM解析モデルを提案し、精度検証を行っている。本解析モデルの精度は、曲げ変形時の肉厚変化と、不均一冷却時の熱変形によって検証された。さらに、シミュレーションの効率化のため、高周波誘導加熱による鋼管の局部加熱に適用可能な新たな簡易熱源モデルが提案され、実用上十分な精度を有していることが確認された。</p> <p>第3章では、開発したFEM解析モデルと実験により3DQにおける鋼管の各種変形特性を明らかにしている。まず、FEM解析を用いて詳細な応力状態を調べることで、加熱領域の幅が鋼管の変形に及ぼす影響を明確にしている。FEM解析によって、鋼管は20 mm程度の狭い領域で変形しており、軟化した高温部が変形前後の材料によって周方向の拘束を受けながら変形していることが明らかになった。さらに、ここで得られた知見に基づき、矩形管の断面高さの変化と肉厚の変化について簡易評価指標を提案している。すなわち、断面高さの変化量は$LH_0/4R$で、肉厚ひずみは$W_0/4R$で整理することが可能である。ここで、H_0は矩形管の断面の初期高さ、W_0は断面の初期の幅、Lは水平面の面の長さ、Rは曲げ半径である。本指標は、部品の初期断面形状と曲げ半径から、断面高さや肉厚の変化の傾向を推定するものであり、部品設計と加工条件策定の効率化をもたらすことができる。また、3DQにおける曲げ加工力とねじりトルクを測定し、これらのFEM解析による予測精度について検討している。その結果、従来の初等解法では考慮されないことが多い加工硬化の考慮が重要であり、加工硬化を考慮した本解析モデルでは高精度に予測できることを明らかにした。</p> <p>第4章においては、3DQにおける成形可能範囲を把握するため、素管の断面形状および3DQ加工中の温度分布がしわの発生限界に及ぼす影響を明らかにしている。また、しわ発生限界についての簡易評価指標を提案している。すなわち、しわ発生限界ひずみε_{CR}は、矩形管の場合</p>			

には $(tL_p)^2$ に対して、丸管の場合には $(tD)^2$ に対してほぼ比例関係となることを明らかにしている。ただし、丸管の場合、 $(tD)^2 > 0.006$ の範囲では塑性屈服が生じ、 $(tD)^2$ との比例関係はなくなる。ここで、 t は初期肉厚、 L_p は矩形管の曲げ内側の平面部の長さ、 D は丸管の場合の外径である。本指標は、部品の断面形状と曲げ半径によって、成形可否を推定可能とするものであり、加工条件の最適化が容易になる。また、送り速度や加熱温度、冷却開始位置によらず、温度分布の形状により、しわ発生限界が整理可能であることを明らかにしている。この中で、温度分布が狭い条件では、温度分布の狭幅化によるしわ限界向上効果が得られるが、温度分布が広い条件ではこの効果が得られないことを明らかにしている。

第 5 章においては、上下方向可動金型を用いて、管の減肉を抑制しつつ周方向の小さな稜線部半径を成形するハイドロフォーミングの検討を行っている。まず、FEM 解析で得られる応力状態に着目し、従来のハイドロフォーミングにおける減肉メカニズムを明らかにしている。従来法においては、鋼管の金型との接触部の端部において減肉が集中する。この部位では、摩擦力による周方向応力の低減効果が得られない上に、板厚方向の圧縮応力が負荷されるために減肉が局所的に進行しやすいことを明らかにしている。つぎに、実験と FEM 解析により上下方向可動金型を用いた成形法での成形特性を調べ、本加工法では曲げ変形が主体となるため、減肉が生じにくく、従来は成形が困難であった小さな稜線部半径が低内圧で成形可能であることを実証している。

第 6 章においては、管の軸方向に移動する金型を用いたハイドロフォーミングの成形特性を検討している。本加工法を用いることで、肉厚分布を均一化しつつ小さな軸方向の稜線部半径を成形可能であることを実証している。また、成形中の摩擦力に着目し、従来法と本加工法を、実験および FEM 解析によって比較している。本加工法では小さな稜線部半径を成形する際に、第 5 章の上下方向可動金型と同様に、曲げ変形が主体となるため肉厚変化が小さいことを明らかにしている。また、可動金型の移動により、管端部の肉厚の増加と、拡管部の肉厚の減少が抑制されることを確認し、本加工法では成形中の管端部近傍の摩擦力は、従来法とは方向が逆で、中央の拡管部への材料流動を促進する方向となることを明らかにしている。

第 7 章は結論で、本研究を総括し、さらに FEM 解析に関する今後の課題について述べている。この中で、本研究で開発した 3DQ の FEM 解析モデルは、流動応力を相当塑性ひずみ、温度、金属組織の体積率の関数としているが、さらなる精度向上のためには温度履歴の影響も考慮する必要があることを指摘している。すなわち、同じ組織、同じ温度であってもそれまでに受けてきた温度履歴によって炭化物の溶け込み等の差異が生じ、その影響で流動応力が変わる可能性があるためである。また、本研究で行ったハイドロフォーミングの FEM 解析結果では使用した要素タイプの違いが顕著に生じた。要素タイプ、ひずみ速度依存性を含めてハイドロフォーミングのモデル化の方法と解析精度に関してさらに検討が必要であることを指摘している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の自動車分野では、両立の難しい燃費と衝突安全性の向上が同時に要求されている。すなわち、構造部材や車体としての強度を向上させた上で、軽量化することが必要となっている。本研究では、この要求に答えるため、中空材である鋼管を用いた二つの新たな加工技術の開発を行い、そこでの成形特性を明らかにしている。

一つは、3次元熱間曲げ焼入れ技術である。本技術は、鋼管を素材として、熱間で3次元曲げを行いながら焼入れする技術である。様々な断面形状を有する強度 1470 MPa 以上の自動車部品を製造可能とするものである。本研究では、3次元熱間曲げ焼入れによる鋼管の変形挙動を解析するために、高周波誘導加熱による温度分布と、金属組織変化を考慮した有限要素法 (FEM) 解析モデルを新たに開発し、その有効性を検証している。さらに FEM 解析の簡略化のための簡易熱源モデルも提案している。また、開発した FEM 解析技術を用いて、鋼管の変形中の応力状態を初めて明らかにし、断面変形のメカニズムを解明している。また、断面変形、肉厚の変化、しわの発生について FEM 解析と初等理論を用いて考察し、各種加工条件がこれらに及ぼす影響を評価する指標を提案し、変形の簡易予測を可能にしている。

もう一つは、可動金型を用いた鋼管ハイドロフォーミング技術である。本研究ではまず減肉の生じやすい従来法の変形に着目し、減肉部では、摩擦力による周方向応力の低減効果が得られない上に、板厚方向の圧縮応力が負荷されるために減肉が進行しやすいことを明らかにしている。つぎに、可動金型を用いた加工法では減肉の少ない曲げ変形が主体となるため、これらの課題を解決可能であることを実証している。また、軸方向に金型を動作させる加工法では、成形中の管端部近傍の摩擦力が、従来法とは方向が逆で、中央の拡張部への材料流入を促進する方向となるため、肉厚が均一化できることを明らかにしている。このように、応力状態や摩擦力に着目して詳細に変形挙動を検証したことで、本加工において減肉を抑制しつつ複雑な断面形状が成形されるメカニズムを明確にしている。

以上のように、本研究では、自動車に使われる中空構造部材の高強度化と、成形可能な形状の範囲の拡大に取り組み、従来不可能であった強度と形状を実現している。これらは、自動車の性能向上と省エネルギーおよび省資源化に大きく貢献するものであり、工業的価値は大きい。また、学術的な面からも、新たなプロセスに適した FEM 解析モデルの開発と精度の検証、FEM 解析と実験による成形メカニズムの詳細解明を行っており、今後の同種のプロセスの研究に対して有効な多くの知見を得ている。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 2 月 20 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降